بررسی تأثیر پارامترهای هندسی بر عیوب در فرآیند شکل‌دهی غلتکی کانال نامتقارن*

یاسر تاجیک[۱] حسن مسلمی نایینی[۲] روح‌اله عزیزی تفتی[۳] داود اکبری[٤] محمدمهدی کسائی[۵]

چکیده در این مقاله ضمن تحلیل عیب‌های پیچش و انحنای طولی در فرآیند شکل‌دهی غلتکی مقاطع کانالی شکل نامتقارن، اثر پارامترهای هندسی مختلف روی این عیوب بررسی شده است. ابتدا مدل اجزای محدود فرآیند با قابلیت پیش‌بینی عیوب ایجاد و برای ارزیابی اعتبار نتایج اجزای محدود، آزمایش‌هایی تجربی انجام شد. سپس با تکرار شبیه‌سازی اجزای محدود اثر پارامترهای هندسی مختلف شامل ضخامت ورق، پهنای کف و عرض بال‌های کانال روی عیوب یاد شده بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت ورق و پهنای کف کانال، زاویه پیچش کاهش می‌یابد و افزایش عرض بال‌های کانال، زاویه پیچش مقطع را افزایش می‌دهد. هم‌چنین روند تغییرات انحنای طولی مشابه با روند تغییرات میانگین کرنش‌های طولی باقی‌مانده در لبه بال‌های کانال می‌باشد.

واژه‌های کلیدی شکل‌دهی غلتکی سرد، کانال نامتقارن، پیچش، انحنای طولی، شبیه‌سازی اجزای محدود

Geometry Effects of Asymmetrical Channel Sections on Common Defects in the Roll Forming Process

Y. Tajik H. Moslemi Naeini R. Azizi Tafti D. Akbari M.M. Kasaei

Abstract *In this research, the twist and the longitudinal bow defects were studied by finite element analysis in the asymmetrical channel sections. Effects of the geometrical properties including the strip thickness, the web width, and the flange width were investigated on the above effects. Some experiments were performed on an industrial roll-forming machine to verify the accuracy of the finite element model. The results showed that the twist angle decreases with the increase of both strip thickness and web width. However, the twist angle increases with the increase of flanges width. Also the variations of the longitudinal bow height are similar to those of the average residual longitudinal strain of both flange edges.*

Key Words Cold Roll-Forming, Asymmetrical Channel Section, Twist, Longitudinal Bow, Finite Element Simulation

---

*تاریخ دریافت مقاله ۹۷/٤/۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۱۲/۱٤ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v30i2.73618

(۱) دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

(۲) نویسندهٔ مسئول: استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران Moslemi@modares.ac.ir

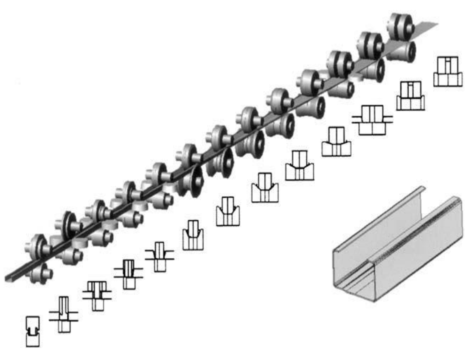
(۳) استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد.

(٤) استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

(۵) استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین ، قزوین.

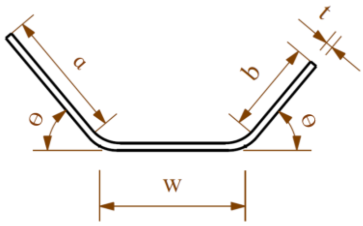
مقدمه

شکل‌دهی غلتکی یک روش برای ایجاد خم‌های پیوسته و متوالی در نوار فلزی است. این خم‌ها با عبور ورق از بین یک مجموعه غلتک‌های دوار ایجاد می‌شوند. در این فرآیند، غلتک‌ها طوری طراحی می‌شوند که جریانی پیوسته و ملایم از فلز را از یک مرحله به مرحله بعد فراهم کنند. تغییرات ناچیز ضخامت ورق در حین فرآیند قابل صرف‌نظر هستند [1]. در شکل (۱)، نمایی از یک فرآیند شکل‌دهی غلتکی نشان داده شده است. با توجه به نیاز صنعت به تولید قطعاتی با مقطع کانالی‌شکل نامتقارن، می‌توان از فرآیند شکل‌دهی غلتکی برای تولید این مقاطع استفاده کرد. این عدم تقارن می‌تواند به‌صورت تفاوت در عرض بال‌ها و یا تفاوت در زاویه آن‌ها باشد. در شکل (۲)، مقطع یک کانال نامتقارن به‌همراه مشخصات هندسی آن نشان داده شده است.



شکل ۱ نمایی از شکل‌دهی غلتکی سرد [1]

پیچش و انحنای طولی، عیب‌های رایج در شکل‌دهی غلتکی مقاطع کانالی‌شکل نامتقارن می‌باشند. به‌دلیل تأثیر نامطلوب این عیوب بر ظاهر و عملکرد محصول، شناخت ساز و کار بروز عیوب در این مقاطع و آگاهی از تأثیر کمیت‌های اثرگذار روی آن‌ها دارای اهمیت بالایی است.



شکل ۲ مشخصات هندسی یک مقطع کانالی شکل نامتقارن

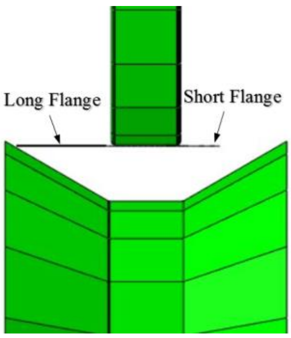
به‌دلیل پیچیدگی فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد، توصیف این فرآیند با یک مدل ریاضی دشوار بوده و به همین دلیل پژوهشگران بیشتر از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های اجزای محدود برای تحلیل فرآیند استفاده کرده‌اند. بیدآبادی و همکاران [2] با استفاده از روش اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی، عیوب دو پهنی سوراخ، چین‌خوردگی لبه و انحنای طولی را در شکل‌دهی غلتکی سرد کانال‌های سوراخ دار بررسی کرد. بیدآبادی و همکاران [3] با استفاده از آزمایش‌های تجربی و روش اجزای محدود، ثاتیر برخی از پارامترها از جمله ضخامت ورق، عرض بال و فاصله بین ایستگاه‌ها را روی گشتاور لازم برای شکل‌دهی غلتکی سرد کانال‌های متقارن بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضخامت ورق بیش‌ترین تأثیر را روی گشتاور لازم دارد. شیرانی و همکاران [4] با استفاده از آزمایش‌های تجربی و روش اجزای محدود، ثاتیر برخی از پارامترها از جمله ضخامت ورق، عرض بال، زاویه شکل‌دهی و فاصله بین ایستگاه‌ها و زاویه خم را روی انحنای طولی برای شکل‌دهی غلتکی سرد کانال‌های متقارن بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که زاویه شکل‌دهی بیش‌ترین و فاصله بین ایستگاه‌ها و شعاع خم کم‌ترین تأثیر را روی انحنای طولی دارد. هم‌چنین با افزایش ضخامت ورق و عرض بال‌ها انحنای طولی کاهش می‌یابد. صفدریان و مسلمی نائینی [5] با استفاده از آزمایش‌های عددی و تجربی، تأثیر برخی از عوامل را بر کرنش طولی لبه و عیب انحنای طولی در محصولات کانالی‌شکل متقارن بررسی کردند.

نتایج آن‌ها نشان داد که کرنش طولی لبه و عیب قوسی شدن، با افزایش زاویه شکل‌دهی افزایش یافته و با افزایش فاصله بین‌ایستگاهی کاهش یافته است. هم‌چنین نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار ضریب اصطکاک و سرعت شکل‌دهی تأثیری بر کرنش‌های طولی لبه ندارند. لیندگرن [6] با استفاده از نرم افزار اجزای محدود مارک منتات طول تغییرشکل و نیز کرنش طولی در لبه مقطع کانالی شکل را بررسی و روابطی را برای آن‌ها ارائه کرد. وی در ادامه تأثیر استحکام ورق را روی طول تغییر شکل و کرنش طولی لبه‌ای بررسی کرد و نتیجه گرفت که با افزایش تنش تسلیم ورق، کرنش طولی لبه‌ای کاهش و طول تغییرشکل افزایش می‌یابد [7]. لیندگرن [8] اثر استحکام ورق را روی نیروها و گشتاورهای شکل‌دهی بررسی نمود و با انجام یک‌سری آزمایش‌ها، رابطه‌هایی تجربی را برای نیروها و گشتاورهای وارد بر غلتک‌ها و توان مصرفی به‌دست آورد. بومن و همکارانش [9] با استفاده از فرمول‌بندی لاگرانژی-اویلری دلخواه در شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند شکل‌دهی غلتکی توانستند در زمان کم‌تر جواب‌های دقیق‌تری را با ریزکردن شبکه‌بندی در نواحی خم و نیز ناحیه‌های نزدیک به غلتک‌ها به‌دست آورند. ویبنگا و همکارانش [10] سعی کردند تا با کمک تحلیل اجزای محدود و روش پاسخ سطح، غلتک‌های ایستگاه آخر را به‌صورتی تنظیم کنند که عیب‌های برگشت فنری و انحنای طولی کاهش یابند. آن‌ها دریافتند که فاصله بین غلتک‌ها بیش‌ترین تأثیر را روی این عیوب دارد. ژنگ و همکارانش [11] از روش آماری پاسخ سطح برای بهینه‌سازی طراحی غلتک‌ها در فرآیند شکل‌دهی غلتکی استفاده کردند. آن‌ها با ایجاد دو مدل برای برگشت فنری و کرنش طولی لبه‌ای بیشینه بر حسب زاویه شکل‌دهی و شعاع غلتک، کوشیدند تا زاویه برگشت فنری را کمینه کرده و کرنش طولی لبه‌ای بیشینه را زیر حد مجاز نگه دارند. سلمانی تهرانی و همکارانش [12] معیار جدیدی را به نام حد کرنش کمانشی مبتنی بر تحلیل اجزای محدود فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد معرفی کردند. بر اساس نتایج پژوهش آن‌ها، یک محصول زمانی فاقد کمانش لبه خواهد بود که کرنش طولی باقی‌مانده در راستای عرضی آن صفر باشد. هم‌چنین، حد کرنش کمانشی مستقل از زاویه شکل‌دهی بوده و تابعی از خواص جنس ورق و نسبت ضخامت ورق به عرض بال است. سلمانی تهرانی و همکارانش [13,14] و با انجام شبیه‌سازی اجزای محدود نشان دادند که با تغییرشکل ورق در هر ایستگاه شکل‌دهی، ناحیه بال در مقایسه با ناحیه‌های خم و کف ورق افزایش طول بیشتری می‌یابد که این افزایش طول پس از خروج از ایستگاه خود را به‌صورت کمانش طولی نشان می‌دهد. اما از آن‌جایی که در ایستگاه بعدی خمش معکوسی به ورق اعمال می‌شود و ناحیه لبه ورق تحت فشار قرار می‌گیرد، لبه ورق ناپایدار و موج‌دار می‌گردد. کسائی [15] علت چین‌خوردگی در فرآیند شکل‌دهی قفسه‌ای لوله را اعمال کاهش محیطی بیش از اندازه در مرحله پره‌ای دانست و با استفاده از این معیار، بیشینه عرض ورق ابتدایی در فرآیند شکل‌دهی قفسه‌ای را پیشنهاد کرد. عزیزی تفتی [16] روشی تحلیلی مبتنی بر انرژی برای محاسبه تنش بحرانی چین‌خوردگی استفاده کرد که مقایسه آن با تنش باقی‌مانده از شکل‌دهی در لبه ورق منجر به محاسبه زاویه بحرانی چین‌خوردگی گردید. معدود کارهای پژوهشی انجام‌شده در زمینه فرآیند شکل‌دهی غلتکی مقاطع کانالی‌شکل نامتقارن، بر روی انواع عیوبی متمرکز شده‌اند که در محصول پس از انجام فرآیند به‌وجود می‌آیند. اونا و جیما [17] فرآیند شکل‌دهی غلتکی کانال‌های نامتقارن را به‌صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها چندین روش تجربی را برای کاهش عیوب در محصول نهایی بیان کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از ایستگاه شکل‌دهی پیچشی هم‌زمان با به‌کارگیری غلتک‌های

شکل‌دهی با زاویه خم بیش‌تر و هم‌چنین جابه‌جایی عرضی غلتک‌ها و تنظیم فشار غلتک‌های شکل‌دهی، مناسب‌ترین ترکیب برای کاهش عیوب در شکل‌دهی کانال‌های نامتقارن با عرض بال‌های متفاوت می‌باشند. چا و کیم [18] به بررسی عیوب پیچش و انحنای طولی در فرآیند شکل‌دهی غلتکی فولادهایی با استحکام بالا پرداختند و با انجام آزمایش‌های تجربی نشان دادند که این عیوب در فولادهای با استحکام بالا بیش‌تر از فولادهای نرم است. آن‌ها دلیل بروز این عیب‌ها را اختلاف کرنش‌های طولی در لبه بال و کف کانال بیان کردند. هم‌چنین، روشی اصلاحی شامل استفاده از یک ایستگاه اضافی را پیشنهاد دادند که طی آن، فشاری روی کف کانال خروجی در راستای ضخامت ورق اعمال می‌شد تا کرنش طولی در کف کانال افزایش یافته و اختلاف مقادیر کرنش‌های طولی در لبه بال و کف کانال کاهش یابد و در نهایت میزان عیب پیچش کم شود. در این مقاله سعی شده است تا علاوه بر بررسی علت بروز عیب‌های پیچش و انحنای طولی در فرآیند شکل‌دهی غلتکی مقاطع کانالی‌شکل نامتقارن، اثر پارامترهای هندسی بر عیوب یاد شده بررسی شود.

پیچش

در فرآیند شکل‌دهی غلتکی مقاطع کانالی‌شکل نامتقارن، شکل‌دهی در بال‌های کانال نامتقارن به‌هنگام عبور ورق از ایستگاه شکل‌دهی، یکسان نبوده و بال بلند قبل از بال کوتاه با غلتک شکل‌دهی تماس پیدا کرده و در نتیجه، پیش از این‌که بال کوتاه در معرض نیروی شکل‌دهی قرار گیرد، از سوی غلتک به بال بلند نیرو وارد می‌شود (شکل ۳). هم‌چنین، مقدار نیروی وارد شده به بال بلند بیش‌تر از بال کوتاه می‌باشد. این امر موجب اعمال نیروهای نامتقارن به بال‌های کانال و درنتیجه به‌وجود آمدن گشتاور پیچشی و بروز عیب پیچش در کانال خروجی می‌گردد. بنابراین، برای توجیه اثر هر کمیت روی زاویه پیچش در ابتدا با محاسبه مقدار نیروی وارد شده به هریک از بال‌های کوتاه و بلند کانال و هم‌چنین فاصله بین نقطه اثر نیروها و مرکز سطح کانال، گشتاور مؤثر روی زاویهٔ پیچش به‌دست آمد و در نهایت اثر آن کمیت روی گشتاور مؤثر مدنظر قرار گرفت. عامل مهم دیگری که در میزان پیچش اثرگذار است، صلبیت پیچشی کانال است. صلبیت پیچشی، مقاومت کانال در برابر تغییرشکل پیچشی است که با افزایش ضخامت ورق، پهنای کف و عرض بال‌های کانال افزایش می‌یابد. در نتیجه می‌توان ادعا نمود که مقدار عیب پیچش با افزایش گشتاور پیچشی مؤثر بر زاویه پیچش و کاهش صلبیت پیچشی کانال افزایش می‌یابد.

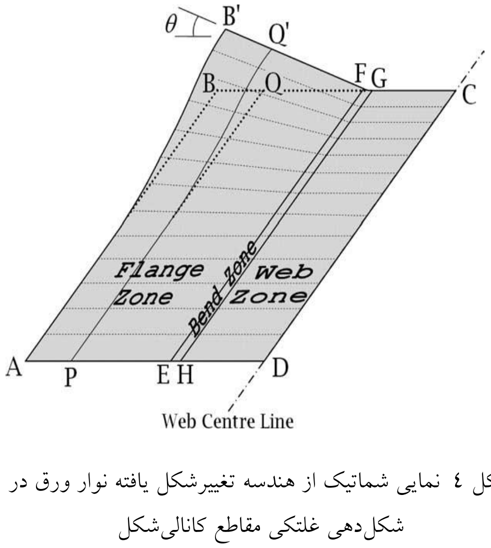


شکل ۳ ماس بال بلند با غلتک پیش از تماس بال کوتاه در شکل‌دهی غلتکی مقاطع کانالی‌شکل نامتقارن

انحنای طولی

مطابق با شکل (٤)، حین شکل‌دهی ورق در هریک از ایستگاه‌ها در فرآیند شکل‌دهی غلتکی، بال کانال می‌بایست مسیری را طی کند که طول آن نسبت به قسمت‌های دیگر از جمله ناحیه خم و کف کانال بیشتر است (به‌عنوان مثال طول مسیر AB' بیشتر از DC است). در نتیجه باریکه‌های طولی در ناحیه بال تحت کشش قرار می‌گیرند که میزان این کشش باریکه‌های طولی با نزدیک شدن آن‌ها به لبه ورق بیش‌تر می‌شود به‌طوری که بیش‌ترین مقدار کشش در لبه بال اتفاق

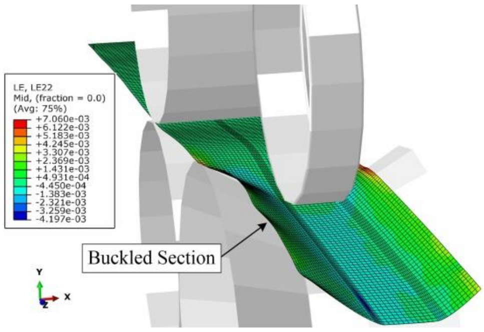
می‌افتد. اما برای اینکه تعادل در راستای طولی برقرار شود، قسمتهایی از عرض نوار ورق در راستای طولی تحت فشار قرار می‌گیرند. این قسمت‌ها شامل ناحیه کف و ناحیه خم ورق است [13]. این تغییرات طول متفاوت باریکه‌های طولی در عرض ورق سبب می‌شود محصول خروجی از ایستگاه کاملا صاف نبوده و دارای انحنا باشد. در نتیجه مقدار کشیدگی لبه ورق، انحنای طولی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از سویی، کرنش طولی در لبه ورق کمیتی است که می‌تواند به‌عنوان ملاکی برای ارزیابی شدت تغییرشکل لبه ورق در نظر گرفته شود. از آن‌جا که مقدار کرنش طولی در هریک از بال‌های کوتاه و بلند کانال نامتقارن متفاوت می‌باشد. بنابراین، برای بررسی اثر هر کمیت روی انحنای طولی اثرهای آن کمیت روی میانگین کرنش‌های طولی لبه‌ای در بال‌های کانال مدنظر قرار گرفت. عامل دیگری که در میزان انحنای طولی اثرگذار است، صلبیت خمشی مقطع است. صلبیت خمشی، مقاومت کانال در مقابل تغییرشکل خمشی است که با افزایش ضخامت ورق، پهنای کف و عرض بال‌ها افزایش می‌یابد. به‌طور کلی می‌توان چنین بیان نمود که انحنای طولی با افزایش کشیدگی بال‌ها و کاهش صلبیت خمشی کانال افزایش می‌یابد.



شکل ٤ نمایی شماتیک از هندسه تغییرشکل یافته نوار ورق در شکل‌دهی غلتکی مقاطع کانالی‌شکل

چین‌خوردگی

به‌طور کلی عیب چین‌خوردگی لبه که به‌صورت موج‌هایی در لبه ورق مشاهده می‌شود، شامل تغییرشکل ناپایدار لبه می‌باشد که به‌علت فشار طولی بیش از حد در لبه ورق به‌وجود می‌آید (شکل ۵). همان‌طور که در بخش (۳)، توضیح داده شد هنگامی‌که ورق از ایستگاه شکل‌دهی عبور می‌کند، کشیدگی لبه ورق نسبت به سایر قسمت‌ها بیش‌تر است. از آنجایی‌که پس از خروج ورق از ایستگاه کلیهٔ قسمت‌های ورق می‌بایست طول یکسانی داشته باشند، لبهٔ ورق در راستای طولی تحت فشار قرار می‌گیرد. بنابراین لبهٔ ورق پس از کشیدگی قابل‌توجه در حین عبور از ایستگاه، پس از خروج از ایستگاه تحت فشار شدید قرار می‌گیرد و هرچه میزان کشیدگی لبه ورق بیش‌تر باشد، فشار بیش‌تری لازم است تا ورق به‌صورت مستقیم از ایستگاه خارج شود. در صورتی‌که مقدار فشردگی بیش از حد باشد می‌تواند به ناپایداری کرنش‌ها و چین‌خوردگی منجر شود. اگر صلبیت خمشی محصول خروجی از ایستگاه کم باشد، محصول پس از خروج از ایستگاه مقاومت کمی در برابر خمش طولی از خود نشان داده و بروز انحنای طولی تنش‌های فشاری در لبه را کاهش می‌دهد. اما اگر صلبیت خمشی محصول خروجی زیاد باشد، مانع از بروز انحنای طولی در محصول شده و تنش‌های فشاری زیادی را در ناحیه لبه بال تولید می‌کند که اگر صلبیت خمشی لبه بال کم باشد می‌تواند منجر به بروز عیب چین‌خوردگی لبه شود. صلبیت خمشی لبه بال، مقاومت لبه ورق در مقابل تغییرشکل ناپایدار است که با افزایش ضخامت ورق افزایش می‌یابد. به‌صورت کلی صلبیت خمشی محصول ارتباط مستقیم با چین‌خوردگی لبه و ارتباط معکوس با انحنای طولی دارد.



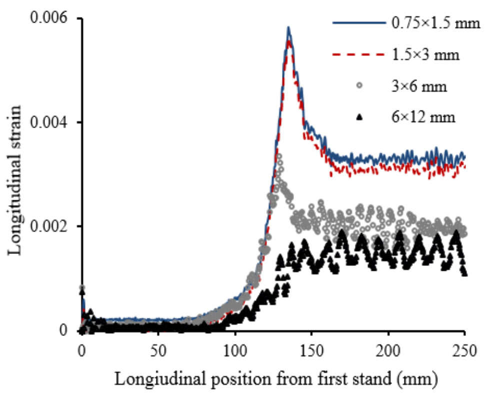
شکل ٥ نمایی شماتیک از چین‌خوردگی لبه در شکل‌دهی غلتکی مقاطع کانالی‌شکل

شبیه‌سازی اجزای محدود

کلیهٔ مراحل مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد در نسخه 6.13 نرم افزار آباکوس انجام شد. به‌دلیل تغییرشکل ناچیز غلتک‌ها در حین فرآیند، غلتک‌ها صلب فرض شدند [16]. از آن‌جا که جسم صلب تحلیلی نیازی به شبکه‌بندی ندارد و از کارایی محاسباتی بالاتری نسبت به جسم صلب گسسته برخوردار است و هم‌چنین، به‌دلیل هموارتر بودن سطوح ایجاد شده در مسائل تماسی، اغتشاش کم‌تری در پاسخ‌ها ایجاد می‌شود، غلتک‌ها به‌صورت یک جسم صلب تحلیلی مدل شدند [19].

از آن‌جا که مدل پوسته به‌خوبی می‌تواند رفتار ورق را در این فرآیند توصیف کند و المان‌های چندمنظوره برای مدل‌سازی کرنش‌های غشایی بزرگ مناسب هستند، المان پوسته‌ی S4R برای مدل‌سازی ورق استفاده گردید. این المان چهارگرهی از روش انتگرال‌گیری کاهش‌یافته استفاده می‌کند. انتگرال‌گیری در طول ضخامت به‌کمک روش سیمپسون و با پنج نقطه انتگرال‌گیری انجام شد. انتخاب اندازه و نوع المان تأثیر قابل توجهی بر جواب‌های مسأله دارد که بایستی با روش سعی و خطا المان بهینه برای شبیه‌سازی مشخص شود [16].

به‌دلیل پیوسته بودن شکل‌دهی غلتکی سرد، همه مقاطع عرضی ورق تغییرشکل مشابهی را در راستای طولی تجربه می‌کنند. در نتیجه، می‌توان شبکه‌بندی در راستای طولی را یکنواخت و طول المان‌ها در این راستا را برابر در نظر گرفت. خمش در راستای عرضی یک مقطع کانالی در سه ناحیه بال، خم و کف متفاوت است که در نتیجه می‌توان طول المان را در راستای عرضی برای این سه ناحیه متفاوت انتخاب کرد. از آن‌جا که بیش‌ترین تغییرشکل خمشی عرضی در ناحیه خم رخ می‌دهد، به‌منظور دست‌یابی به دقیق‌ترین جواب در کم‌ترین زمان ممکن، بیش‌ترین تمرکز المان در جهت عرضی در ناحیه خم منظور شد و طول المان‌ها برای ناحیه‌های کف و بال برابر در نظر گرفته شد. با کوچک کردن اندازه‌ی المان و مقایسه‌ی جواب‌های به‌دست‌آمده، در شرایطی که جواب‌ها تفاوت قابل توجهی نکند، اندازه‌ی بهینه‌ی المان به‌دست می‌آید. شکل (٦)، نمودار حساسیت به اندازه المان را بر حسب کرنش طولی در فاصله ۱/۵ میلی‌متری از لبه بال نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اندازه المان ۱/۵ mm × ۳ mm بهینه می‌باشد و در نواحی کف و بال‌های کانال این اندازه انتخاب شد. اندازه المان در ناحیه‌های خم یک‌سوم نواحی دیگر یعنی ۰/۵ mm × ۳ mm انتخاب گردید. هم‌چنین در این شبیه‌سازی المان‌های ورق از نوع "غالباً چهارگوش (Quad-dominate)" و تعداد نود هر المان چهار عدد انتخاب شد.

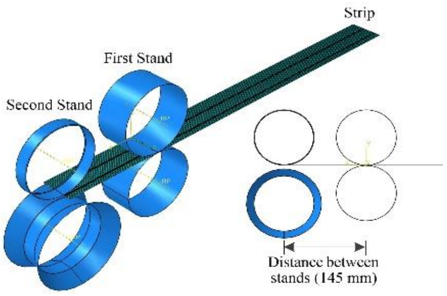


شکل ٦ تأثیر اندازه المان روی کرنش‌های طولی لبه‌ای

در سرهم‌بندی اجزای مدل، ورق به‌عنوان مرجع در نظر گرفته شد و غلتک‌ها نسبت به آن موضع داده شدند. به‌منظور نگه‌داشتن ورق در آغاز شبیه‌سازی، یک ایستگاه قبل از ایستگاه شکل‌دهی قرار داده شد که هیچ نقشی در شکل‌دهی ورق نداشت. غلتک‌های ایستگاه شکل‌دهی در لبه جلویی ورق قرار داده شدند. از آن‌جا که ورق به‌صورت پوسته‌ای بدون ضخامت مدل شد، برای مماس کردن غلتک‌ها با ورق، فاصله‌ای برابر با نصف ضخامت ورق بین غلتک‌ها و پوسته در نظر گرفته شد. غلتک‌های پایینی ایستگاه شکل‌دهی که زاویه‌دار بوده و وظیفه خم‌کردن ورق را داشتند در ارتفاعی مناسب زیر ورق مستقر شدند به‌گونه‌ای که در آغاز شبیه‌سازی تماسی با ورق نداشته باشند. با شروع شبیه‌سازی، غلتک پایینی ایستگاه شکل‌دهی به سمت بالا جابه‌جا می‌شد تا این‌که به سطح پایینی ورق مماس شود. در مرحله بعد، غلتک‌های ایستگاه شکل‌دهی و غلتک‌های استوانه‌ای در ایستگاه نگه‌دارنده شروع به دوران کرده و در اثر نیروی اصطکاک بین ورق و غلتک‌های ایستگاه شکل‌دهی، ورق به سمت جلو کشیده می‌شد. با توجه به این‌که غلتک‌ها با استفاده از مدل صلب تحلیلی مدل شدند، برای تعریف تماس آن‌ها با ورق از الگوریتم زوج تماسی و گزینه سطح به سطح استفاده شد. در این تحقیق دو نوع کنش تماس مماسی در نظر گرفته شد. در حالی‌که برای تماس ورق با غلتک‌های ایستگاه نگه‌دارنده از مدل تماس بدون اصطکاک استفاده شد، تماس ورق با غلتک‌های ایستگاه شکل‌دهی با تماس پنالتی و مدل اصطکاکی کولمب و ضریب اصطکاک همسانگرد ۰/۲توصیف شد [4,5,13,14,20].

از آن‌جا که فرآیند شکل‌دهی غلتکی یک فرآیند شبه‌استاتیک است [1]، برای شبیه‌سازی اجزای محدود این فرآیند می‌توان از حل‌گرهای صریح و ضمنی استفاده نمود. در این مقاله از تحلیل صریح به‌دلیل داشتن زمان شبیه‌سازی و واگرایی کم‌تر استفاده شده است. در روش صریح برای کاهش بیش‌تر زمان محاسبات از روش افزایش سرعت شکل‌دهی استفاده شد که در این روش باید شرط شبه‌استاتیک بودن فرآیند شکل‌دهی غلتکی با توجه به راهنمای نرم‌افزار آباکوس بررسی شود [19,21]. به‌منظور برآورده شدن شرایط فوق، سرعت مطلوب در شبیه‌سازی‌ها ۲ m/s انتخاب شد. مرکز جرم هریک از غلتک‌ها که روی محور دوران آن بود به‌عنوان نقطه مرجع آن غلتک تعریف شد. جابه‌جایی عمودی رو به بالای غلتک‌های پایینی بر اساس مقدار ارتفاعی که در زیر ورق موقعیت‌دهی شده بودند و سرعت دورانی غلتک‌های بر اساس سرعت خطی شکل‌دهی ورق و قطر پایه غلتک‌ها مشخص گردید.

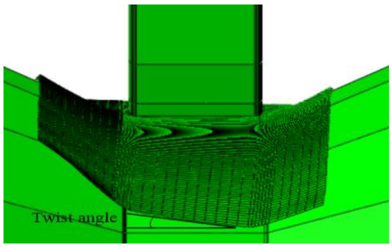
برای تعریف خواص ماده در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، پس از انجام آزمون کشش تک‌محوری، از منحنی تنش حقیقی-کرنش پلاستیک حقیقی استفاده شد. ورق مورد نظر به‌صورت ارتجاعی-خمیری مدل شد و بدین‌منظور مدول الاستیک و ضریب پواسون برای تعریف رفتار ارتجاعی ورق و ضریب‌های ناهمسان‌گردی در راستاهای مختلف به‌صورت شش ضریب برای نرم‌افزار تعریف شدند. شکل (۷)، نمایی از مدل اجزای محدود برای یکی از شبیه‌سازی‌های دو ایستگاهی را نشان می‌دهد.



شکل ۷ نمایی از مدل اجزای محدود دو ایستگاهی

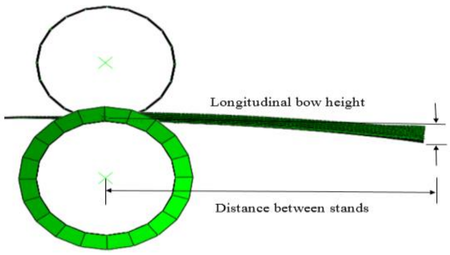
اندازه‌گیری عیوب پیچش و انحنای طولی در شبیه‌سازی اجزای محدود. نحوهٔ به‌دست آوردن زاویهٔ پیچش و ارتفاع انحنای طولی در شکل‌های (۸ و ۹)

نشان داده شده‌اند. زمانی که ورق به اندازه فاصله بین ایستگاه‌ها (۱۴۵ میلی‌متر) از ایستگاه شکل‌دهی خارج شد، زاویه لبه جلویی ورق در کف پروفیل نسبت به راستای افق به‌عنوان زاویهٔ پیچش در نظر گرفته شد.



شکل ۸ نحوه محاسبه زاویه پیچش در شبیه‌سازی اجزای محدود

برای محاسبهٔ ارتفاع انحنای طولی دو نقطه روی خط مرکزی ورق در نظر گرفته شد که یکی در ایستگاه شکل‌دهی در خط مرکزی غلتک‌ها و دیگری روی لبه جلویی ورق قرار داشت. زمانی که لبه جلویی ورق به اندازه فاصله بین ایستگاه‌ها از ایستگاه شکل‌دهی خارج شد، فاصله عمودی بین دو نقطه ذکر شده به‌عنوان ارتفاع انحنای طولی در نظر گرفته شد.



شکل ۹ نحوه محاسبه ارتفاع انحنای طولی در شبیه‌سازی اجزای محدود

آزمایش‌های تجربی

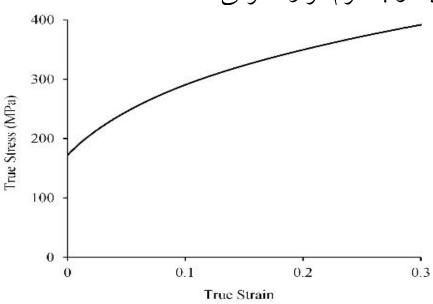
آزمایش‌های تجربی به‌منظور مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی‌های اجزای محدود با داده‌های تجربی و صحت‌سنجی مدل اجزای محدود انجام گردید. بر این اساس، آزمایش‌هایی برای ارزیابی توانایی مدل اجزای محدود در پیش‌بینی کرنش‌های طولی در نزدیکی لبهٔ ورق و مقدار زاویه پیچش و انحنای طولی در یک ایستگاه شکل‌دهی انجام شدند. آزمایش‌های تجربی برای ۳ نمونه تکرار و میانگین مقادیر به‌دست آمده گزارش گردید.

مشخصات کانال. کانال‌های نامتقارن با مشخصات هندسی ذکر شده در جدول (۱)، برای آزمون تجربی مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۱ مشخصات هندسی کانال نامتقارن در آزمون تجربی

پارامتر	نماد	مقدار
ضخامت ورق	t	۲ میلی‌متر
عرض بال کوتاه	a	۳۰ میلی‌متر
عرض بال بلند	b	۲۰ میلی‌متر
پهنای کف	w	۳۰ میلی‌متر
زاویه شکل‌دهی	ϴ	۳۰ درجه

مشخصات مواد. برای انجام آزمایش‌های تجربی از ورق‌های فولادی St12 استفاده شد. برای تعیین دقیق خواص مکانیکی ورق آزمون کشش تک محوری مطابق با استاندارد ASTM E8 انجام گرفت و منحنی تنش حقیقی-کرنش حقیقی پلاستیک فولاد به‌عنوان مشخصات جنس ورق در ناحیه خمیری مطابق با شکل (۱۰)، به نرم‌افزار معرفی شد. برای تحلیل ناحیه ارتجاعی، نسبت پواسون ۰/۳ و مدول یانگ ۲۰۷ گیگاپاسکال در نظر گرفته شد. در ادامه طبق استاندارد ASTM-E517 ضرایب ناهمسانگردی با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از آزمون کشش تک‌محوری، محاسبه و به نرم‌افزار معرفی شد.



شکل ۱۰ منحنی تنش حقیقی-کرنش حقیقی پلاستیک ماده

دستگاه شکل‌دهی. برای شکل‌دهی ورق‌ها از ماشین شکل‌دهی غلتکی با اعمال تغییراتی واقع در شرکت لوله و پروفیل پایا در اصفهان استفاده شد. دستگاه مذکور دارای هفت ایستگاه شکل‌دهی بود که برای انجام آزمون‌ها، دو ایستگاه از دستگاه با فاصله ۳۰۰ میلی‌متر از یکدیگر مورد استفاده قرار گرفت. هم‌چنین برای هدایت دقیق ورق به داخل ایستگاه‌ها به‌گونه‌ای که راستای حرکت ورق کاملا موازی با محور طولی ماشین باشد، از غلتک‌های استوانه‌ای هدایت‌شونده قبل از ایستگاه اول استفاده شد (شکل ۱۱). هم‌چنین به‌منظور شکل‌دهی ورق در حالتی پایدار و جلوگیری از ارتعاشات غیرقابل کنترل دستگاه و اثرات آن روی نتایج، سرعت خطی شکل‌دهی ۲۷ mm/s انتخاب گردید.

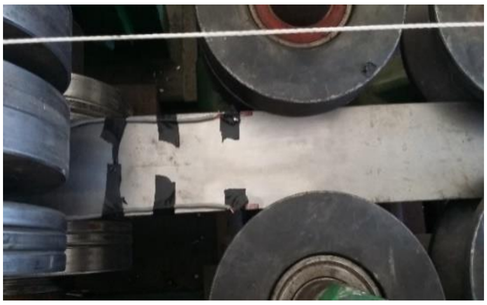
اندازه‌گیری کرنش در آزمون تجربی. به‌منظور اندازه‌گیری کرنش طولی، از کرنش‌سنج‌های مقاومت الکتریکی TML FLA5-11 استفاده شد. کرنش‌سنج‌ها در راستای عرضی به فاصله ۲ میلی‌متر از لبه ورق و به فاصله ۳۰۰ میلی‌متر در راستای طولی از لبه جلویی ورق چسبانده شدند. هم‌چنین برای جلوگیری از برخورد کرنش‌سنج‌ها با غلتک بالایی، غلتک‌ها چندتکه ساخته شدند (شکل ۱۲).



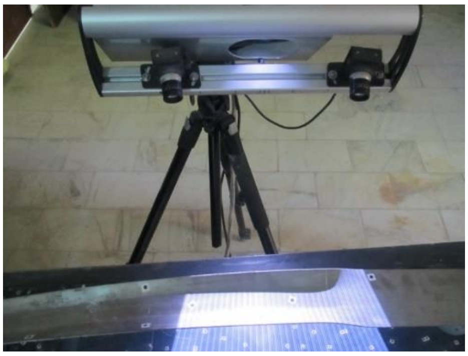
شکل ۱۱ دستگاه مورد استفاده برای آزمون تجربی

اندازه‌گیری عیوب در آزمون تجربی. به‌منظور به‌دست آوردن هندسه سه بعدی پروفیل‌های تولید شده، از روش اندازه‌گیری نوری استفاده شد. در این روش اندازه‌گیری اسکنر نوری با اسکن بخش به بخش قطعه و اتصال بخش‌های مختلف اسکن شده در محیط نرم‌افزار مرتبط به آن، هندسه سه‌بعدی قطعه مورد نظر را به صورت ابر نقاط ایجاد می‌کند. دستگاه اسکنر نوری که در این اندازه‌گیری‌ها مورد استفاده قرار گرفت مدل Range Vision 3D Scanner Standard Plus می‌باشد که دارای دقت ۰/۰۳ میلی‌متر است.





شکل ۱۲ استفاده از کرنش‌سنج‌ها بر روی صفحه بالایی ورق: استفاده از غلتک‌های راهنما به‌منظور هدایت ورق به داخل ایستگاه (چپ)، غلتک‌های ایستگاه شکل‌دهی (راست)



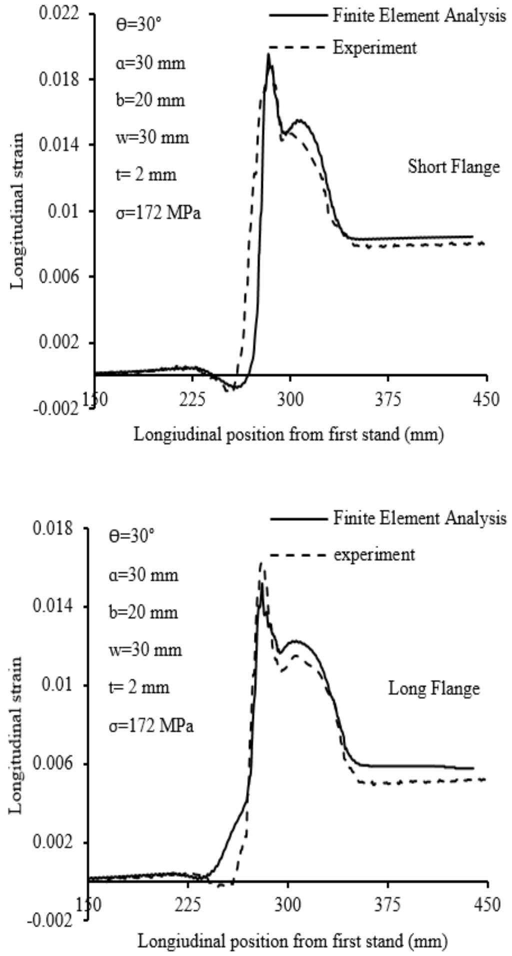
شکل ۱۳ اسکنر نوری برای اندازه‌گیری عیوب پیچش و انحنای طولی

نتایج و بحث

اعتبارسنجی مدل اجزای محدود. تاریخچه کرنش‌های طولی لبه‌ای در صفحه بالایی ورق که در آزمون تجربی اندازه گرفته شد با نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود در شکل (۱٤)، مقایسه شده‌اند. مطابق با جدول (۲)، مشاهده می‌شود که حداکثر اختلاف نسبی بین کرنش‌های طولی لبه‌ای بیشینه و باقی‌مانده به‌دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمون تجربی، در بال‌های کوتاه و بلند به‌ترتیب ۷/۵ و ۱۱/۵− درصد می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل اجزای محدود به‌خوبی توانسته است کرنش‌های طولی را پیش‌بینی نماید.

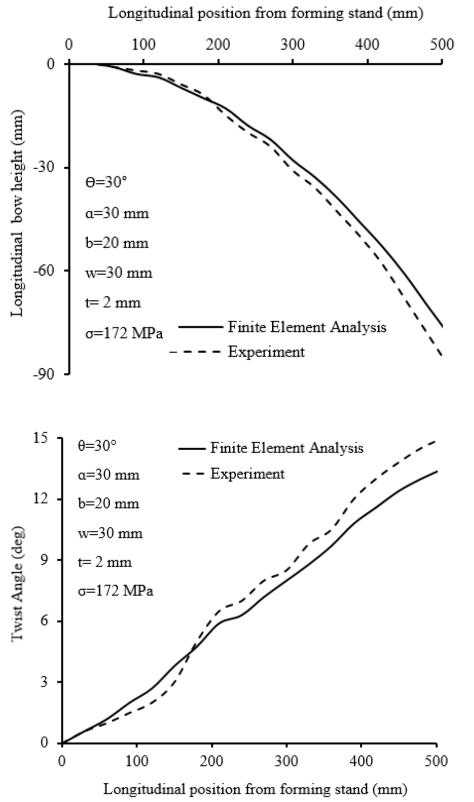
جدول ۲ کرنش‌های طولی لبه‌ای بیشینه و باقی‌مانده حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمون تجربی و همچنین اختلاف نسبی آن‌ها

		شبیه‌سازی	تجربی	اختلاف نسبی (٪)
بال کوتاه	کرنش بیشینه	۰/۰۱۷٦	۰/۰۱۹۰	۷/٤
	کرنش باقی‌مانده	۰/۰۰۷٤	۰/۰۰۸۰	۷/۵
بال بلند	کرنش بیشینه	۰/۰۱٤۷	۰/۰۱٦۲	۹/۲
	کرنش باقی‌مانده	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۵۲	−۱۱/۵

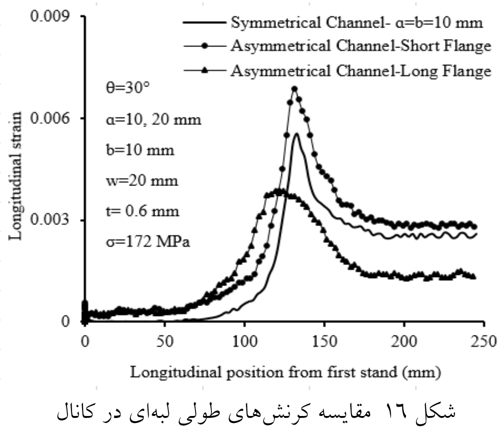


شکل ۱٤ مقایسه کرنش‌های طولی حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی در بال کوتاه و بال بلند

همچنین، زاویه پیچش و ارتفاع انحنای طولی که در آزمون تجربی اندازه گرفته شدند با نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود در شکل (۱۵)، مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که حداکثر اختلاف نسبی بین ارتفاع انحنای طولی و زاویه پیچش به‌دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمون تجربی، به‌ترتیب کم‌تر از ۱۰ و ۱۵ درصد می‌باشد.



شکل ۱۵ مقایسه زاویه پیچش و ارتفاع انحنای طولی حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش‌های تجربی



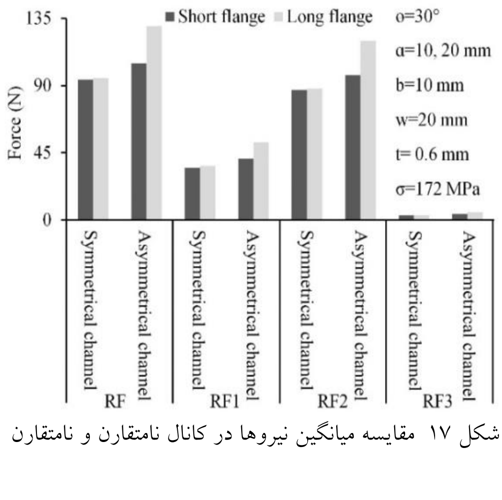
شکل ۱٦ مقایسه کرنش‌های طولی لبه‌ای در کانال متقارن و نامتقارن

اثر نامتقارن بودن کانال روی کرنش‌های طولی. در شکل (١٦)، میانگین کرنش‌های طولی لبه‌ای در بال‌های کانال متقارن با کرنش‌های طولی لبه‌ای در هر یک از بال‌های کوتاه و بلند کانال نامتقارن مقایسه شده است. مشاهده می‌شود برخلاف کانال متقارن که مقدار کرنش‌های طولی در لبه دو بال بسیار نزدیک به‌یکدیگر می‌باشند، در کانال نامتقارن کرنش‌های طولی لبه‌ای در بال‌های کوتاه و بلند در فاصله‌های یکسان از ایستگاه نگه‌دارنده متفاوت است. هم‌چنین، مقادیر کرنش‌های طولی لبه‌ای بیشینه و باقی‌مانده در بال کوتاه بیش‌تر از بال بلند می‌باشند.

بررسی بیش‌تر شکل (١٦)، نشان می‌دهد که با تغییر طراحی کانال از متقارن به نامتقارن، کرنش‌های ابتدایی در لبه بال بلند نسبت به بال کوتاه زودتر رشد کرده و در نتیجه، کشیدگی لبه بال بلند زودتر شروع می‌شود. این امر نشان می‌دهد که برخلاف کانال متقارن، شکل‌دهی در بال‌های کانال نامتقارن یکسان نبوده و از حالت متعادل از نظر هندسی خارج می‌گردد. بنابراین هرچه کشیدگی بال‌های کانال نامتقارن قبل از رسیدن به ایستگاه شکل‌دهی (کرنش طولی لبه‌ای بیشنه) یکسان بوده و اختلاف کرنش‌های طولی لبه‌ای در بال‌های کانال در فاصله یکسان از ایستگاه نگه‌دارنده، کم‌تر باشد، مقدار عیب پیچش نیز کم‌تر می‌باشد. هم‌چنین، میانگین مقادیر کرنش‌های طولی لبه‌ای باقی‌مانده در بال‌های کانال نامتقارن را می‌توان به‌عنوان معیاری برای ارزیابی تغییرشکل پلاستیک لبه بال‌ها درنظر گرفت.

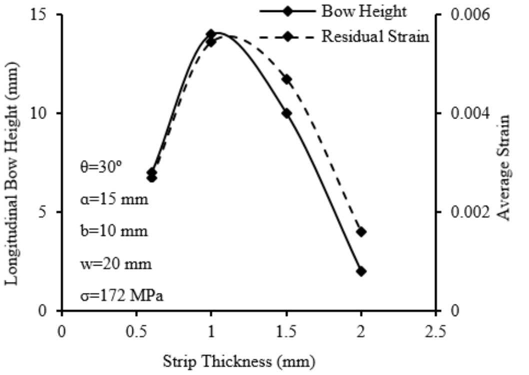
اثر نامتقارن بودن کانال روی نیرو. به‌منظور بررسی و مقایسه نیروهای وارد شده به هر یک از بال‌های کانال نامتقارن، غلتک‌های شکل‌دهی پایینی برای به‌صورت سه‌تکه طراحی شدند. در شکل (١٧)، نیروهای وارد شده به بال‌های کانال نامتقارن نشان داده شده است. در این شکل متغیرهای RF، RF1، RF2 و RF3 به‌ترتیب نشان‌دهنده برآیند نیروها، نیروی وارد شده در راستای عرض ورق (X)، نیروی وارد شده در راستای ضخامت ورق (Y) و نیروی وارد شده در راستای طول ورق (Z) می‌باشند. مشاهده می‌شود که برای کانال متقارن تفاوت

قابل‌ملاحظه‌ای در مقدار نیروی وارد شده به بال‌های کانال وجود ندارد. در صورتی‌که با تغییر کانال متقارن به نامتقارن، نیروهای وارد شده به هر دو بال افزایش یافته و نیروی وارد شده به بال بلند بیش‌تر از بال کوتاه می‌باشد. به‌همین دلیل، جهت پیچش در کانال نامتقارن به‌گونه‌ای است که بال بلند به سمت بال کوتاه نزدیک می‌شود. بنابراین با توجه به نتایج حاصل از شکل (۱۷)، می‌توان نتیجه گرفت که اختلاف نیروهای وارد شده به دو بال کوتاه و بلند کانال نامتقارن به‌خصوص در راستای ضخامت ورق، باعث به‌وجود آمدن گشتاور پیچشی در مقطع کانال خروجی و در نهایت بروز عیب پیچش می‌گردد. به‌عبارت دیگر هر چه اختلاف نیروهای وارد شده به بال‌های کانال در راستای ضخامت ورق بیش‌تر باشد، گشتاور پیچشی مؤثر بیش‌تری به کانال وارد شده و زاویه پیچش مقطع خروجی بیش‌تر خواهد بود.



شکل ۱۷ مقایسه میانگین نیروها در کانال نامتقارن و نامتقارن

اثر ضخامت ورق روی انحنای طولی و پیچش. در شکل (۱۸)، تأثیر ضخامت ورق روی انحنای طولی و میانگین کرنش‌های طولی لبه‌ای باقی‌مانده در بال‌های کانال نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که افزایش ضخامت ورق انحنای طولی و کرنش طولی لبه‌ای باقی‌مانده میانگین را افزایش و سپس کاهش می‌دهد. هم‌چنین، برای شرایط شکل‌دهی ذکر شده در شکل (۱۸)، عیب چین‌خوردگی لبه در ضخامت‌هایی کم‌تر از ۰/۶ میلی‌متر وجود داشته که با افزایش ضخامت ورق از بین می‌رود.

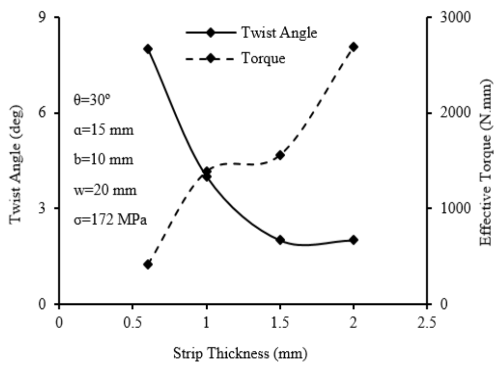


شکل ۱۸ اثر ضخامت ورق روی انحنای طولی و میانگین کرنش‌های باقی‌مانده

از آنجا که ضخامت ورق صلبیت خمشی محصول را زیاد می‌کند، بنابراین زمانی‌که ضخامت ورق کم است (کم‌تر از ۱ میلی‌متر)، افزایش ضخامت ورق از یک‌سو انحنای طولی را زیاد می‌کند و از سوی دیگر احتمال بروز عیب چین‌خوردگی در لبه را کاهش می‌دهد. بنابراین در ضخامت‌های کم، اثر افزایش تغییر شکل پلاستیک در لبه با افزایش ضخامت ورق بیش‌تر از اثر زیاد شدن صلبیت خمشی محصول است که در نتیجه انحنای طولی زیاد می‌شود. اما در عین حال، افزایش ضخامت ورق صلبیت خمشی لبه را زیاد کرده و با محدود کردن چین‌خوردگی در لبه، آزاد شدن تنش‌های فشاری از طریق بروز چین‌خوردگی لبه را محدود کرده و انحنای طولی را افزایش می‌دهد. زمانی‌که ضخامت ورق زیاد است (بیش‌تر از ۱ میلی‌متر)، افزایش ضخامت ورق انحنای طولی را کاهش داده و در عین حال استعداد لبه را برای بروز عیب چین‌خوردگی کاهش می‌دهد. بنابراین در ضخامت‌های زیاد، کاهش میانگین کرنش‌های طولی باقی‌مانده با افزایش ضخامت ورق و زیاد شدن صلبیت

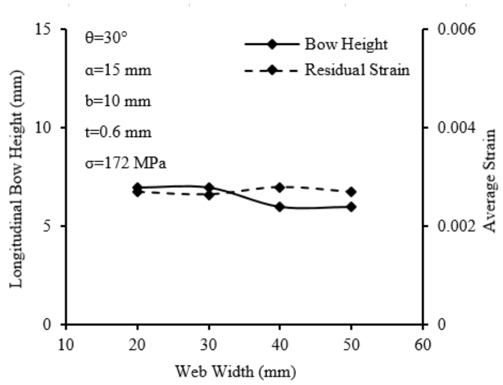
خمشی محصول موجب می‌شود انحنای طولی کم شود. در عین حال عیب چین‌خوردگی لبه به‌دلیل افزایش صلبیت خمشی لبه بال کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، اگر صلبیت خمشی لبه بال زیاد باشد چین‌خوردگی لبه رخ نخواهد داد حتی اگر صلبیت خمشی محصول زیاد باشد. بررسی بیش‌تر شکل (۱۸)، نشان می‌دهد که روند تغییرات ارتفاع انحنای طولی مشابه با روند تغییرات میانگین کرنش‌های طولی لبه‌ای باقی‌مانده است.

شکل (۱۹)، تأثیر ضخامت ورق روی زاویهٔ پیچش مقطع و گشتاور مؤثر روی زاویه پیچش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت ورق گشتاور مؤثر افزایش و زاویهٔ پیچش کاهش می‌یابد. برای شرایط شکل‌دهی ذکر شده در شکل (۱۹)، با افزایش ضخامت ورق نیروی وارد شده به هریک از بال‌های کوتاه و بلند کانال و هم‌چنین اختلاف نیروهای وارد شده به بال‌های کانال افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به افزایش صلبیت پیچشی محصول با افزایش ضخامت ورق و عدم تفاوت قابل‌ملاحظه در اختلاف مقادیر کرنش‌های طولی ابتدایی در بال‌های کانال برای ضخامت‌های مختلف ورق، می‌توان چنین نتیجه گرفت که اثر افزایش صلبیت پیچشی محصول با افزایش ضخامت ورق بیش‌تر از گشتاور مؤثر است و زاویه پیچش را کم می‌کند.



شکل ۱۹ اثر ضخامت ورق روی زاویهٔ پیچش و گشتاور مؤثر

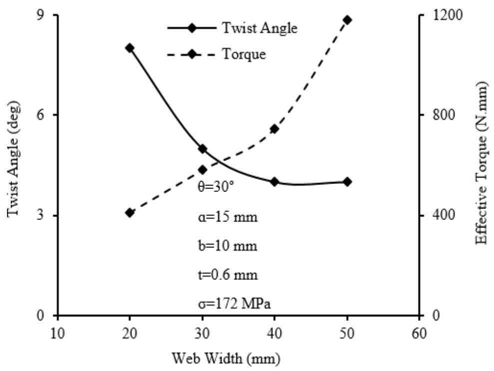
اثر پهنای کف روی انحنای طولی و پیچش. در شکل (۲۰)، تأثیر پهنای کف روی انحنای طولی و میانگین کرنش‌های طولی لبه‌ای باقی‌مانده در بال‌های کانال نشان داده شده است. مشاهده می‌شود پهنای کف اثر مستقلی روی میانگین کرنش‌های طولی لبه‌ای باقی‌مانده نداشته و انحنای طولی را به مقدار جزئی کاهش می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش صلبیت خمشی ناشی از افزایش پهنای کف اثر خود را به‌صورت جلوگیری از افزایش انحنای طولی گذاشته است.



شکل ۲۰ اثر پهنای کف روی انحنای طولی و میانگین کرنش‌های باقی‌مانده

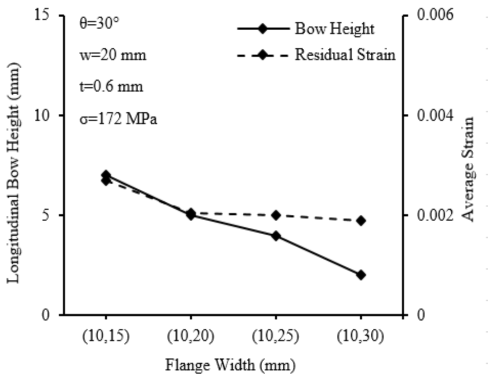
شکل (۲۱)، تأثیر پهنای کف روی زاویهٔ پیچش مقطع و گشتاور مؤثر روی زاویه پیچش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افزایش پهنای کف، گشتاور مؤثر را افزایش و زاویه پیچش مقطع را کاهش می‌دهد. برای شرایط شکل‌دهی ذکر شده در شکل (۲۱)، هرچند با افزایش پهنای کف اختلاف نیروهای وارد شده به بال‌های کانال تغییر قابل‌ملاحظه نمی‌کند، ولی از آن‌جا که فاصله بین نقطه اثر نیروها از یکدیگر افزایش می‌یابد، گشتاور مؤثر روی زاویه پیچش نیز افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به عدم تغییر قابل‌ملاحظه در اختلاف مقادیر کرنش‌های طولی ابتدایی در بال‌های کانال و هم‌چنین افزایش صلبیت پیچشی محصول با افزایش پهنای کف، می‌توان نتیجه گرفت که اثر افزایش صلبیت پیچشی محصول با

افزایش پهنای کف بیش از گشتاور مؤثر روی عیب پیچش است و زاویه پیچش را کم می‌کند.



شکل ۲۱ اثر پهنای کف روی زاویهٔ پیچش و گشتاور مؤثر

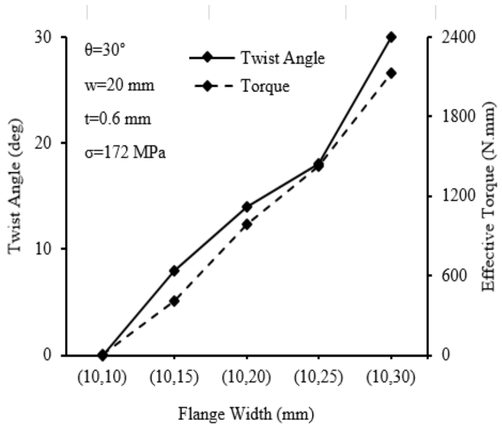
اثر عرض بال‌ها روی انحنای طولی و پیچش. در شکل (۲۲)، تأثیر عرض بال‌ها روی انحنای طولی و میانگین کرنش‌های طولی لبه‌ای باقی‌مانده در بال‌های کانال نشان داده شده است.



شکل ۲۲ اثر عرض بال‌ها روی انحنای طولی و میانگین کرنش‌های باقی‌مانده

مشاهده می‌شود که با افزایش عرض بال، ارتفاع انحنای طولی و میانگین کرنش‌های طولی لبه‌ای باقی‌مانده کاهش می‌یابند. هم‌چنین، برای شرایط شکل‌های ذکر شده در شکل (۲۲)، در عرض بال‌های ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر و بیش‌تر از این مقدار بروز عیب چین‌خوردگی لبه مشهود است و با افزایش تدریجی عرض بال‌ها مقدار آن افزایش می‌یابد. بنابراین افزایش صلبیت خمشی محصول و کاهش تغییرشکل پلاستیک در بال‌ها با افزایش عرض بال سبب کاهش ارتفاع انحنای طولی می‌شود. اما در عین حال افزایش عرض بال با محدود کردن انحنای طولی، آزاد شدن تنش‌های فشاری از طریق انحنای طولی را محدود کرده و احتمال بروز چین‌خوردگی را بالا می‌برد. بررسی بیش‌تر شکل (۲۲)، نشان می‌دهد که روند تغییرات ارتفاع انحنای طولی مشابه با روند تغییرات میانگین کرنش‌های طولی لبه‌ای باقی‌مانده است.

شکل (۲۳)، اثر عرض بال‌ها روی زاویهٔ پیچش مقطع و گشتاور مؤثر بر زاویهٔ پیچش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش عرض بال بلند، زاویهٔ پیچش مقطع و گشتاور مؤثر افزایش می‌یابند.



شکل ۲۳ اثر عرض بال‌ها روی زاویهٔ پیچش و گشتاور مؤثر

برای شرایط شکل‌دهی ذکر شده در شکل (۲۳)، با افزایش عرض بال‌های کانال، نیروی وارد شده به هریک از بال‌ها و فاصله بین نقطه اثر نیروها افزایش می‌یابند. در نتیجه گشتاور مؤثر روی زاویه پیچش نیز افزایش می‌یابد. از آن‌جا که افزایش عرض بال‌ها سبب افزایش صلبیت پیچشی محصول می‌شود. می‌توان چنین نتیجه گرفت که اثر افزایش گشتاور مؤثر روی عیب پیچش با افزایش عرض بال بلند بیش از افزایش صلبیت پیچشی محصول است و زاویه پیچش را زیاد می‌کند.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله عیب‌های متداول در فرآیند شکل‌دهی غلتکی مقاطع کانالی‌شکل نامتقارن مورد بررسی قرار گرفتند و از شبیه‌سازی اجزای محدود به منظور بررسی اثر پارامترهای هندسی شامل ضخامت ورق، پهنای کف و عرض بال‌ها روی عیوب استفاده گردید. همچنین، برای اطمینان از صحت مدل اجزای محدود آزمایش‌های تجربی انجام شدند و سپس نتایج حاصل از آزمون تجربی با مقادیر به‌دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود مقایسه گردید. نتایج حاصل از این تحقیق به‌صورت خلاصه به‌صورت ذیل می‌باشند:

۱- در فرآیند شکل‌دهی غلتکی مقاطع کانالی‌شکل نامتقارن، بال بلند قبل از بال کوتاه با غلتک تماس پیدا کرده و در نتیجه پیش از این‌که بال کوتاه در معرض نیروی شکل‌دهی قرار گیرد، از سوی غلتک به بال بلند نیرو وارد می‌شود و نیروی وارد شده به بال بلند بیش‌تر از بال کوتاه می‌باشد. این امر موجب اعمال نیروهای نامتقارن به بال‌های کانال و به‌وجود آمدن ممان پیچشی و در نهایت بروز عیب پیچش در کانال خروجی می‌گردد. همچنین، به‌هنگام عبور ورق از ایستگاه شکل‌دهی، کشیدگی لبه بال بلند نسبت به بال کوتاه زودتر شروع شده و در نتیجه شکل‌دهی بال‌های کانال از حالت متقارن خارج می‌شود.

۲- برای مقاطع بررسی شده، با افزایش ضخامت ورق و پهنای کف زاویه پیچش مقطع کاهش می‌یابد. در حالی‌که افزایش عرض بال‌های کانال موجب افزایش زاویه پیچش می‌گردد.

۳- روند تغییرات انحنای طولی مشابه با روند تغییرات میانگین کرنش‌های طولی لبه‌ای باقی‌مانده در بال‌های کانال می‌باشد. بنابراین، میانگین کرنش‌های طولی لبه‌ای باقی‌مانده می‌تواند به‌عنوان ملاکی برای ارزیابی ارتفاع انحنای طولی مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین هر چه میانگین کرنش‌های طولی لبه‌ای باقی‌مانده بیش‌تر باشد انحنای طولی نیز بیش‌تر خواهد بود.

واژه‌نامه

الگوریتم زوج تماسی	General pair algorithm
چهارگوش	Quad-dominate
صریح	Explicit
ضمنی	Implicit

مراجع

1. Halmos, G., *Roll forming handbook*. CRC Press, (2005).
2. Shirani Bidabadi, B., Moslemi Naeini, H., Azizi Tafti, R. and Barghikar, H., "Experimental study of bowing defects in pre-notched channel section products in the cold roll forming process", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 87, No. 1-4, pp. 997-1011, (2016).
3. Shirani Bidabadi, B., Moslemi Naeini, H. and Azizi Tafti, R., "Experimental and numerical study of required torque in the cold roll forming of symmetrical channel sections", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 27, pp. 63-75, (2017).
4. Shirani Bidabadi, B., Moslemi Naeini, H., Tehrani, S. and Barghikar, H., "Experimental and numerical study of bowing defects in cold roll-formed, U-channel sections", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 118, pp. 243-253, (2016).
5. Safdarian, R. and Moslemi Naeini, H., "The effects of forming parameters on the cold roll forming of channel section", *Thin-Walled Structures*, Vol. 92, pp. 130-136, (2015).
6. Lindgren, M., "An improved model for the longitudinal peak strain in the flange of a roll formed U-channel developed by FE-analyses", *Steel Research International*, Vol. 78, (2007).

7. Lindgren, M., "Cold roll forming of a U-channel made of high strength steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, pp. 77-81, (2007).
8. Lindgren, M., "Experimental investigations of the roll load and roll torque when high strength steel is roll formed", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191, pp. 44-47, (2007).
9. Boman, R., Papeleux, L., Bui, Q. and Ponthot, J., "Application of the Arbitrary Lagrangian Eulerian formulation to the numerical simulation of cold roll forming process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, pp. 621-625, (2006).
10. Wiebenga, J., Weiss, M., Rolfe, B. and Boogaard, A., "Product defect compensation by robust optimization of a cold roll forming process", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, pp. 978-986, (2012).
11. Zeng, G., Li, S., Yu, Z. and Lai, X., "Optimization design of roll profiles for cold roll forming based on response surface method", *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 1930-1938, (2009).
12. Farzin, M., Salmani Tehrani, M and Shameli, E., "Determination of Buckling Limit of Strain in Cold Roll Forming by the Finite Element Analysis", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 125-126, pp. 626-632, (2002).
13. Salmani Tehrani, M., Hartley, P., Moslemi Naeini, H. and Khademizadeh, H., "Localized edge buckling in cold roll-forming of symmetric channel section", *Thin-Walled Structures*, Vol. 44, pp. 184-196, (2006).
14. Salmani Tehrani, M., Hartley, P., Moslemi Naeini, H. and Khademizadeh, H., "Localized edge buckling in cold roll-forming of circular tube section", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, pp. 617-620, (2006).
15. Kasaei, M.M., Moslemi Naeini, H., Azizi Tafti, R. and Salmani Tehrani, M., "Prediction of maximum initial strip width in the cage roll forming process of ERW pipes using edge buckling criterion", *Journal of materials processing technology*, Vol. 214, pp. 190-199, (2014).
16. Azizi Tafti, R., "Theoretical, numerical, and experimental investigation of edge wrinkling defect in cold roll forming of symmetric channel sections", PhD Thesis, Mechanical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, (2013).
17. Ona, H. and Jimma, T., "Experiments into the cold roll-forming of straight asymmetrical channels", *Journal of Mechanical Working Technology*, Vol. 8, pp. 273-291, (1983).
18. Cha, W. and Kim, N., "Study on twisting and bowing of roll formed products made of high strength steel", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 14, PP. 1527-1533, (2013).
19. A. Manuals, Getting Standard with ABAQUS, (2013).
20. Bui, Q. and Ponthot, J., "Numerical simulation of cold roll-forming processes", *Journal of materials processing technology*, Vol. 202, No. 1-3, pp. 275-282, (2008).
21. Prior, A., "Applications of implicit and explicit finite element techniques to metal forming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 45, PP. 649-656, (1994).